



段爱国,孙建军,邓宗富,等.杉木第三代亲本杂交子代生长遗传变异及选择研究[J].江西农业大学学报,2022,44(2):261-270.

DUAN A G,SUN J J,DENG Z F,et al.Studies on genetic variation and evaluation of hybrid offspring of the parents in the third generation seed orchards of Chinese fir[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(2):261-270.

杉木第三代亲本杂交子代生长遗传变异及选择研究

段爱国^{1,2},孙建军³,邓宗富³,张建国^{1,2}

(1.中国林业科学研究院 林业研究所/林木遗传育种国家重点实验室/国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091;2.南京林业大学 南方现代林业协同创新中心,江苏 南京 210037;3.中国林业科学研究院 亚热带林业实验中心,江西 分宜 336600)

摘要:【目的】通过分析杉木第三代亲本杂交子代生长性状的遗传变异,旨在开展三代家系及四代优树选择,为大岗山地区提供优良造林家系及第四代育种群体构建材料。【方法】在对2~7年生22个杉木第三代亲本全同胞家系的树高、胸径、冠幅和单株材积遗传分析基础上,利用BLUP方法,通过构建亲缘关系矩阵,对树高、胸径和单株材积育种值进行估测。【结果】全同胞家系间生长表型变异丰富,单株材积变异系数最大,可作为家系选择的主要生长性状。树高、胸径和单株材积家系遗传力分别为0.116~0.274、0.217~0.253和0.203~0.290。以7年生时家系单株材积育种值为选择指标,选择速生型优良家系6个,入选率约27%,入选家系树高、胸径和单株材积的现实增益分别达2.92%、16.36%和54.92%。6年生时选择准确度趋于稳定,可作为杉木优良家系早期选择的参考林龄。采用配合选择方法,选择出39个优株,单株入选率为5.53%,入选单株树高、胸径及单株材积现实增益分别为28.38%、59.86%和218.53%。【结论】杉木第三代全同胞优良家系仍具有较高材积增益,入选优良单株可用于第四代育种群体构建。

关键词:杉木;杂交子代;遗传力;育种值;第三代种子园

中图分类号:S791.27 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2022)02-0261-10

Studies on Genetic Variation and Evaluation of Hybrid Offspring of the Parents in the Third Generation Seed Orchards of Chinese fir

DUAN Aiguo^{1,2}, SUN Jianjun³, DENG Zongfu³, ZHANG Jianguo^{1,2}

(1. Research Institute of Forestry, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of the State Forestry Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Experiment Center of Sub-tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi, Jiangxi 336600, China)

收稿日期:2021-08-29 修回日期:2022-01-04

基金项目:国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFD)

Project supported by the National Key R & D Projects in the 14th Five Year Plan(2022YFD)

作者简介:段爱国,研究员,博士,博士生导师,主要从事林木遗传改良与定向培育研究,orcid.org/0000-0003-2583-8312,duanag@caf.ac.cn。

Abstract: [Objective] The genetic variation of growth traits of 22 Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) full-sib families from the parents of the third generation seed orchards were analyzed to select the third generation excellent families and elite trees for the building of the fourth generation breeding population in Dagang mountain production area of Chinese fir. [Method] Based on genetic analysis of tree height (H), diameter at breast height (D), crown width and individual volume (V) from 2-year-old to 7-year-old, the breeding values of tree height, diameter at breast height and individual volume were estimated by using BLUP method. [Result] The phenotypic variation among the full-sib families was abundant. The individual volume had the largest coefficient of variation, and could be used as the main growth trait for family selection. The family heritability of H, D and V were 0.116–0.274, 0.217–0.253 and 0.203–0.290, respectively. Taking the breeding value of individual volume of 7-year-old families as the selection index, six excellent fast-growing families were selected, and the selection rate was about 27%. The actual genetic gains of H, D and V of selected families were 2.92%, 16.36% and 54.92% respectively. The accuracy of selection tended to be stable at the age of 6 years, which can be used as a reference age for early selection of superior families of Chinese fir. As a result, total 39 individuals derived from 12 different families were selected by the method of combination selection, and the selection rate of individuals was 5.53%. The individual genetic gains of H, D and V were 28.38%, 59.86% and 218.53% respectively. [Conclusion] The third generation full-sib superior families of Chinese fir still had high volume gain, and the selected individuals could be used to construct the fourth generation breeding population.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; hybrid offspring; heritability; breeding value; third generation seed orchards

【研究意义】高世代发展是世界主要针叶用材树种育种技术推进的共同趋势^[1]。美国的火炬松改良已进入第四代育种水平,澳大利亚辐射松已完成了第三代改良,开始进入新一轮的遗传改良策略的调整,加拿大云杉及欧洲落叶松育种已进入第三代改良阶段。杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)作为中国主要针叶用材树种,在中心产区基本完成第三代育种,新创制第四代种质步入测定阶段,亟需开展子代遗传增益评价,筛选第四代育种亲本并应用于生产,以提升杉木良种使用率和贡献率。【前人研究进展】杉木遗传改良在种源选择^[2-3]、种子园技术^[4-6]和无性系选育^[7-9]等方面取得重要进展,围绕杉木高世代遗传改良,递进式地开展了杉木第三代种子园建立技术^[10]、亲本遗传多样性^[11]和子代生长性状评估^[12-14]等研究。最佳线性无偏预测法(best linear unbiased prediction, BLUP)是针对不平衡资料提出的育种值预测方法^[15-16],其既能估计固定的环境效应和遗传效应,又能预测随机的遗传效应,有效地消除各种非遗传因素的影响,实现育种值的最佳线性无偏估计,因而可提高选择的准确性。BLUP技术已在马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)^[17]、落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)^[18]、火炬松(*Pinus taeda* L.)^[19]和云杉(*Picea asperata* Mast.)^[20]等树种育种中得到广泛应用。【本研究切入点】杉木第三代育种亲本子代生长的评价仍十分不足,且已有研究多集中于苗期或幼林抚育期,以及半同胞子代测定,缺乏子代生长表现的连续评价和杂交产生的全同胞子代的测定研究,而准确估计育种值的BLUP技术较少见于杉木育种研究。【拟解决的关键问题】本文采用BLUP技术对杉木第三代亲本杂交子代遗传参数进行估算,以有效选择高世代亲本杂交组合及优良育种材料。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验林位于江西省分宜县大岗山山下林场,低山,地处罗霄山脉北端的武功山支脉,位于27°34'N, 114°33'E。试验地海拔高度360 m,东北坡,母岩为砂页岩,黄棕壤,土壤厚度1 m以上。年平均气温16.8℃,降雨量1 656 mm,年蒸发量1 503 mm。顶级植被类型为常绿阔叶林。

1.2 试验设计

试验材料为引自贵州省黎平县的22个杉木第三代亲本杂交组合,杂交亲本均具优良速生性状,为黎平县东风林场第三代种子园建园亲本。供试杂交组合由贵州省林业科学研究院于2012年杂交获得,2013年育苗,2014年春引种栽植。带状整地,栽植穴30 cm×30 cm×40 cm。采用随机区组设计,8次重复,4株单列小区,株行距2 m×2 m。参试材料包括22个全同胞家系,参试家系父母本组成见表1,采用杉木第二代种子园混系实生苗为对照(CK)。分别于2014,2015,2016,2017,2018,2019年底(计1年苗龄,分别为2,3,4,5,6,7年生)对试验林进行每木调查,采用测高杆测定每木树高(H :m);采用胸径尺测定后3年每木胸高直径(D :cm),同时测定每木冠幅(CW :m)。单株材积(V :m³)采用部颁二元材积公式($V = 0.000\ 058\ 777\ 042D^{1.969\ 983\ 1}H^{0.896\ 461\ 57}$)求算。

1.3 遗传参数分析

采用ASreml-R软件(版本3.0),利用混合线性模型对生长性状树高、胸径和单株材积分别进行方差分析、遗传力及育种值求算。

(1)以重复区组为固定效应,以杂交组合为随机效应,构建家系和个体育种值估算模型。BLUP预测每个个体性状育种值,公式参考刘天颐等^[19]。

利用家系模型预测控制授粉家系育种值的模型如下:

$$Y_{jkl} = \mu + R_j + D_k + M_l + RDM_{jkl} + e_{jklm} \quad (1)$$

式(1)中: Y_{jkl} 表示性状观测值; μ 为总体平均值; R_j 表示第 j 个区组的固定效应; D_k 表示第 k 个父本随机效应; M_l 表示第 l 个母本随机效应; RDM_{jkl} 表示区组与亲本的随机交互; e_{jklm} 为第 j 个区组中第 k 个父本与第 l 个母本交配后代中的第 m 个个体上的剩余误差。

利用个体模型以及个体间的亲缘关系系数预测个体育种值的模型如下:

$$Y_{jkl} = \mu + R_j + T_{jkl} + RF_{jk} + e_{jkl} \quad (2)$$

式(2)中, Y_{jkl} 表示第 j 区组第 k 个家系第 l 个个体的性状观测值; μ 为总体平均值; R_j 表示第 j 区组的固定效应; T_{jkl} 第 j 区组第 k 个家系第 l 个个体的随机效应; RF_{jk} 表示区组与家系的随机交互; e_{jkl} 第 j 区组第 k 个家系第 l 个个体上的剩余误差。

(2)各性状家系遗传力计算公式为: $h_f^2 = \sigma_f^2 / (\sigma_f^2 + \frac{\sigma_e^2}{r})$,式中: σ_f^2 为家系的方差分量; σ_e^2 为机误方差分量; r 为重复数。

(3)遗传变异系数和表型变异系数采用下列公式计算: $CV_g = \sqrt{\delta_f^2 / \bar{X}}$, $CV_p = \sqrt{\delta_p^2 / \bar{X}}$,其中, CV_g 和 CV_p 分别表示遗传变异系数和表型变异系数, δ_p^2 表示表型方差, \bar{X} 表示性状总平均值。

(4)家系遗传增益为: $\Delta G(\%) = (x - X)h_f^2 / X \times 100$,式中, ΔG 为家系遗传增益, x 为入选家系性状均值, X 为对照群体性状均值。

(5)家系现实增益为: $G = (x - X) / X$ 。

(6)配合选择个体现实增益的计算公式为: $G = (x_s - X) / X$,式中: G 表示遗传增益, x_s 为入选单株群体生长性状均值。

2 结果与分析

2.1 不同林龄生长性状表型变异

22个杉木全同胞家系在不同林龄时4个生长性状的生长情况见表1。由表1可知,不同家系生长良好,7年生时平均树高、胸径、单株材积及冠幅分别为5.79 m、9.60 cm、0.028 0 m³和2.64 m,年均生长量分别达到0.83 m、1.37 cm、0.004 0 m³和0.38 m,超过《杉木速生丰产用材林》林业行业标准规定的I类地杉木林生长量(7年生:树高5.6 m;胸径6.7 cm)。不同调查年度家系树高、胸径、单株材积和冠幅的表型变异系数浮动范围分别为0.21~0.33、0.27~0.35、0.67~0.77和0.25~0.34,全同胞家系间表型变异丰富,这为优良家系选择提供了基础。除冠幅外,树高、胸径和单株材积的表型变异系数具有随林龄增大而减小的趋势,表明随着林龄的增大,各家系这3个生长性状的表型差异逐渐减小。

表 1 不同林龄 22 个杉木第三代亲本全同胞家系生长情况
Tab.1 The growth performance of full-sib families from the third generation parents of Chinese fir at the different stand ages

性状 Traits	调查年份 Year	林龄/a Age	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	表型变异系数 Phenotypic variation coefficient	性状 Traits	调查年份 Year	林龄/a Age	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	表型变异系数 Phenotypic variation coefficient
树高/m <i>H</i>	2014	2	0.79	0.26	0.33	胸径/cm <i>D</i>	2017	5	5.46	1.91	0.35
	2015	3	1.81	0.52	0.29		2018	6	7.25	2.29	0.32
	2016	4	2.88	0.77	0.27		2019	7	9.60	2.59	0.27
	2017	5	4.19	0.92	0.22	单株材积/m ³ <i>V</i>	2017	5	0.007 4	0.005 7	0.77
	2018	6	5.14	1.09	0.21		2018	6	0.014 9	0.010 9	0.73
	2019	7	5.79	1.21	0.21		2019	7	0.028 0	0.018 6	0.67
	冠幅/m <i>H</i> (CK)	2019	7	5.90	1.23	0.21	CW/m	2018	6	2.43	0.61
胸径/cm <i>D</i> (CK)	2019	7	8.91	2.16	0.23	2019		7	2.64	0.91	0.34
单株材积/m ³ <i>V</i> (CK)	2019	7	0.021 5	0.017 3	0.74						

2.2 不同林龄生长性状遗传变异

供试家系树高、胸径、单株材积的方差分量和遗传力估算值见表 2。从表 2 可知,2~7 年生的树高遗传变异系数范围为 0.026~0.070,在 5~7 年生的胸径和单株材积遗传变异系数的变化范围分别为 0.048~0.070 和 0.116~0.169。22 个家系在 2~7 年生的树高家系遗传力变异范围为 0.116~0.274,在 5~7 年生的胸径和单株材积家系遗传力的变化范围分别为 0.217~0.253 和 0.203~0.290,这 3 个生长性状均表现出受到一定程度的遗传控制。比较而言,单株材积的家系遗传变异系数和遗传力均高于树高性状。单株材积的遗传变异系数最大,可作为家系选择的主要生长性状。

表 2 不同林龄杉木第三代亲本全同胞家系方差分量和遗传力估算
Tab.2 Variance component and heritability of full-sib families from the third generation parents of Chinese fir at the different stand ages

林龄/a Age	树高/m <i>H</i>				胸径/cm <i>D</i>				单株材积/m ³ <i>V</i>			
	家系 σ_f^2 Family	误差 σ_e^2 Residual	家系遗传力 h_f^2 Family heritability	遗传变异系数 Phenotypic variation coefficient	家系 σ_f^2 Family	误差 σ_e^2 Residual	家系遗传力 h_f^2 Family heritability	遗传变异系数 Phenotypic variation coefficient	家系 σ_f^2 Family	误差 σ_e^2 Residual	家系遗传力 h_f^2 Family heritability	遗传变异系数 Phenotypic variation coefficient
2	0.003	0.064	0.274	0.070								
3	0.007	0.258	0.169	0.045								
4	0.014	0.586	0.163	0.042								
5	0.024	0.812	0.193	0.037	0.147	3.459	0.253	0.070	1.57×10^{-6}	3.07×10^{-5}	0.290	0.169
6	0.037	1.119	0.210	0.038	0.177	4.903	0.224	0.058	5.50×10^{-6}	1.10×10^{-4}	0.286	0.158
7	0.022	1.366	0.116	0.026	0.215	6.217	0.217	0.048	1.05×10^{-5}	3.23×10^{-4}	0.206	0.116

2.3 家系育种值估算和优良家系选择

表 3 列出了 22 个家系在 7 年生时的树高、胸径和单株材积的生长量平均值及育种值。从表 3 可看出,3 个生长性状的家系育种值与家系实际观测值大小排序具有明显差异,但总体上呈现出较高的相似

性。经 Pearson 相关检验,树高、胸径和单株材积的家系育种值与观测值均呈极显著线性正相关,相关系数分别达 0.979 4、0.985 3 和 0.985 8(图 1)。单株材积、树高和胸径育种值大于 0 的家系数分别为 12、12 和 11 个。以 7 年生时家系单株材积育种值为选择指标,同时考虑获得一定比例的遗传增益,选择排名前 6 位的家系作为优良家系,入选率约 27%,入选优良家系树高、胸径和单株材积平均值分别达 6.07 m、10.37 cm 和 0.033 3 m³,6 个人选家系树高、胸径和单株材积的平均遗传增益分别为 0.57%、3.55% 和 11.31%,现实增益达 2.92%、16.36% 和 54.92%。显然,这批全同胞家系表现出了良好的径向生长特性和材积增益。

表 3 7 年生时 22 个杉木家系树高、胸径和单株材积育种值排序
Tab.3 Breeding values of height,diameter at the breast height and individual volume of 22 Chinese fir families at age 7

排名 Rank	树高/m H			胸径/cm D			单株材积/m ³ V		
	家系 Family	均值/m Mean	育种值 Breeding value	家系 Family	均值/cm Mean	育种值 Breeding value	家系 Family	均值/m ³ Mean	育种值 Breeding value
1	F16	6.25	7.39×10 ⁻⁷	F4	10.47	1.28×10 ⁻⁶	F14	0.035 7	9.85×10 ⁻⁹
2	F11	6.08	5.65×10 ⁻⁷	F16	10.55	1.25×10 ⁻⁶	F16	0.035 3	9.59×10 ⁻⁹
3	F12	6.04	5.44×10 ⁻⁷	F11	10.45	1.23×10 ⁻⁶	F13	0.033 4	7.86×10 ⁻⁹
4	F14	6.10	5.22×10 ⁻⁷	F14	10.39	1.04×10 ⁻⁶	F4	0.032 0	6.39×10 ⁻⁹
5	F7	6.01	4.99×10 ⁻⁷	F12	10.12	8.48×10 ⁻⁷	F11	0.032 0	6.15×10 ⁻⁹
6	F13	6.05	4.61×10 ⁻⁷	F13	10.23	6.82×10 ⁻⁷	F12	0.031 4	5.74×10 ⁻⁹
7	F4	5.90	2.99×10 ⁻⁷	F15	10.03	6.43×10 ⁻⁷	F7	0.029 8	3.86×10 ⁻⁹
8	F20	5.95	2.14×10 ⁻⁷	F7	9.82	4.51×10 ⁻⁷	F9	0.029 9	2.25×10 ⁻⁹
9	F10	5.96	1.91×10 ⁻⁷	F9	9.81	2.48×10 ⁻⁷	F15	0.029 4	2.24×10 ⁻⁹
10	F1	5.87	1.34×10 ⁻⁷	F1	9.62	1.33×10 ⁻⁷	F10	0.030 0	1.72×10 ⁻⁹
11	F18	5.99	1.33×10 ⁻⁷	F10	9.76	7.08×10 ⁻⁸	F20	0.028 4	5.97×10 ⁻¹⁰
12	F15	5.85	1.23×10 ⁻⁷	F18	9.76	-1.07×10 ⁻⁸	F1	0.027 8	3.51×10 ⁻¹⁰
13	F19	5.71	-3.63×10 ⁻⁸	F20	9.33	-1.95×10 ⁻⁷	F18	0.027 5	-1.14×10 ⁻⁹
14	F9	5.67	-2.06×10 ⁻⁷	F8	9.41	-3.95×10 ⁻⁷	F21	0.026 0	-2.83×10 ⁻⁹
15	F21	5.66	-2.67×10 ⁻⁷	F21	9.30	-4.07×10 ⁻⁷	F8	0.025 9	-3.92×10 ⁻⁹
16	F8	5.64	-3.30×10 ⁻⁷	F19	9.15	-4.59×10 ⁻⁷	F19	0.023 6	-4.60×10 ⁻⁹
17	F17	5.53	-3.81×10 ⁻⁷	F3	8.81	-8.81×10 ⁻⁷	F6	0.024 4	-4.92×10 ⁻⁹
18	F3	5.40	-5.20×10 ⁻⁷	F22	8.99	-9.18×10 ⁻⁷	F3	0.021 8	-5.67×10 ⁻⁹
19	F6	5.46	-6.24×10 ⁻⁷	F5	8.88	-9.64×10 ⁻⁷	F22	0.023 6	-6.53×10 ⁻⁹
20	F22	5.45	-6.37×10 ⁻⁷	F6	8.86	-9.78×10 ⁻⁷	F5	0.022 5	-7.48×10 ⁻⁹
21	F2	5.34	-6.38×10 ⁻⁷	F17	8.77	-1.08×10 ⁻⁶	F17	0.021 9	-7.67×10 ⁻⁹
22	F5	5.33	-7.85×10 ⁻⁷	F2	8.12	-1.58×10 ⁻⁶	F2	0.017 4	-1.19×10 ⁻⁸

利用 BLUP 法求解单性状混合线性模型方程组同时获得 22 个家系树高、胸径和单株材积在不同林龄的育种值,以 7 年生单株材积育种值为标准,发现基于不同生长性状在不同林龄时的育种值进行选择时,所选择的 6 个优良家系均存在不同比例的漏选和错选。以 7 年生树高和 6 年生胸径育种值进行选择会造成 16.67% 的漏选率;在 5 年生时进行选择,单株材积的漏选率为 16.67%,低于树高和胸径的漏选率 33.33%;2 年生、3 年生和 4 年生树高的漏选率分别为 66.67%、50% 和 50%(图 2)。由图 2 可知,优良家系选择随着林龄的增加,选择准确率增加。

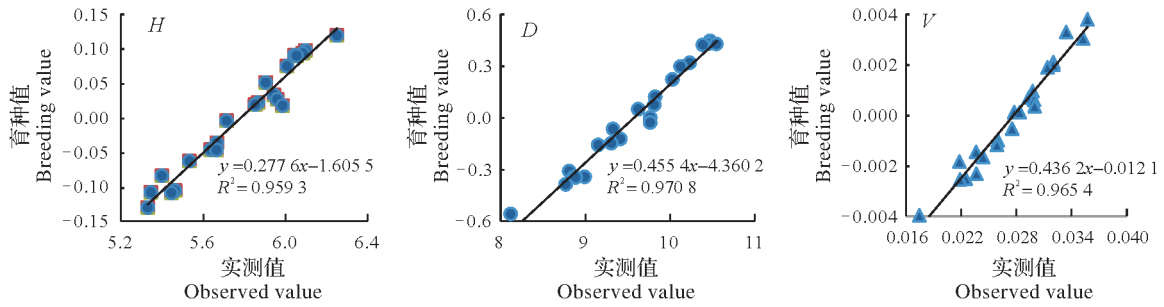


图1 22个家系树高(H)、胸径(D)及单株材积(V)育种值与实测值相关分析

Fig.1 The pearson correlation between observed height (H), diameter at the breast height (D) and individual volume (V) of the families and breeding value of the families

图3列出了根据7年生单株材积育种值选择出的6个优良家系在不同林龄育种值的排名情况(5~7年生按单株材积;2~4年生按树高)。由图3可看出,所选择的优良家系在不同林龄阶段的排名具有较大变化。优良家系F16和F11在2~7年生均能入选,生长优势较为稳定,但存在优良家系如F12和F4在早期排名较后的情况。假设需要在不同林龄时均能选择出这6个优良家系,则5年生和4年生时的选择率需分别提高到50%和64%,而3年生及2年生时显然不适宜进行早期选择。

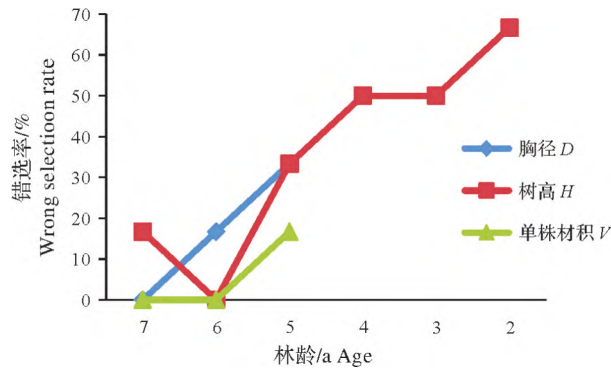


图2 以不同林龄树高、胸径及单株材积育种值选择优良家系的错选率

Fig.2 The wrong selection of excellent families according to the breeding values of height (H), diameter at the breast height (D) and individual volume (V) at different stand ages

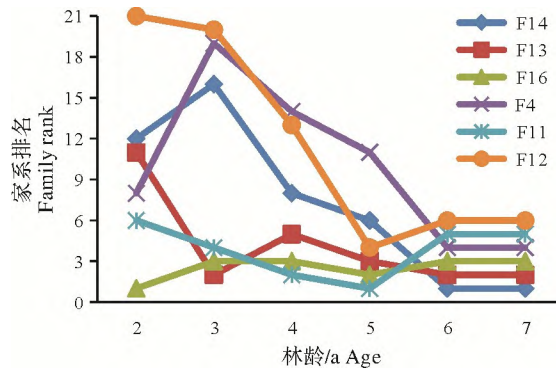


图3 不同林龄时优良家系育种值排名变化

Fig.3 The rank change of breeding values of the excellent families at different stand ages

2.4 单株育种值预测与第四代优树选择

利用BLUP方法计算了704个单株在7年生时主要生长性状的育种值。为了尽可能保持较为广泛的遗传多样性,同时保证较高的遗传增益,依据单株材积育种值的大小,考虑限制同一家系入选优树总数及优良家系少量多选的问题,从6个优良家系中选出29个优株。另选择个体育种值大于0、单株材积较高的10个优株,其中从排名第7的家系F7和排名第8的家系F15分别选出3株和2株,共选择出39个优株(表4),单株入选率为5.53%。入选单株树高、胸径和单株材积平均值分别达7.57 m、14.24 cm和0.068 3 m³,年平均生长量分别为1.08 m、2.03 cm和0.009 8 m³,单株遗传增益分别为28.38%、59.86%和218.53%。

表 4 入选个体 7 年生时生长表现和预测的育种值

Tab.4 Growth performance and predicted breeding values of selected trees at the age of 7 years

单株编号 Tree ID	家系 Family	家系排名 Family rank	母本 Female parent	父本 Male parent	重复号 Repetition No.	生长性状 Growth performance			育种值 Breeding value		
						树高/m	胸径/cm	单株材积/m ³	树高/m	胸径/cm	单株材积/m ³
						<i>H</i>	<i>D</i>	<i>V</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>V</i>
52	F13	2	60	64	1	18.30	9.20	0.131 9	0.174 12	0.699 48	0.007 29
494	F14	1	60	97	6	15.80	8.70	0.093 9	0.171 98	0.673 35	0.006 39
229	F14	1	60	97	3	14.90	8.10	0.078 5	0.168 33	0.660 40	0.006 03
496	F14	1	60	97	6	14.60	8.00	0.074 6	0.160 26	0.633 03	0.005 78
495	F14	1	60	97	6	13.90	8.30	0.070 0	0.165 29	0.609 52	0.005 63
584	F14	1	60	97	7	14.50	8.00	0.073 6	0.154 81	0.606 64	0.005 63
225	F13	2	60	64	3	13.90	8.30	0.070 0	0.166 66	0.567 00	0.005 45
583	F14	1	60	97	7	13.60	7.80	0.063 4	0.151 46	0.576 40	0.005 31
228	F13	2	60	64	3	14.10	7.10	0.062 6	0.146 57	0.573 72	0.005 21
665	F13	2	60	64	8	13.80	7.80	0.065 2	0.148 28	0.515 82	0.005 06
50	F13	2	60	64	1	14.10	6.80	0.060 2	0.133 95	0.558 37	0.005 03
325	F16	3	73	89	4	16.50	7.60	0.090 6	0.156 91	0.643 94	0.004 98
316	F13	2	60	64	4	12.90	7.30	0.053 8	0.149 05	0.508 91	0.004 81
326	F16	3	73	89	4	15.10	6.60	0.067 1	0.140 17	0.596 90	0.004 23
63	F16	3	73	89	1	14.50	7.00	0.065 3	0.140 13	0.585 89	0.004 19
327	F16	3	73	89	4	14.00	7.00	0.060 9	0.146 86	0.559 94	0.004 04
415	F16	3	73	89	5	12.20	8.20	0.053 5	0.167 46	0.525 15	0.003 95
221	F12	6	545	6	3	15.00	7.90	0.077 8	0.130 44	0.486 19	0.003 49
224	F12	6	545	6	3	14.00	7.70	0.066 3	0.127 09	0.452 59	0.003 13
135	F12	6	545	6	2	13.90	8.10	0.068 4	0.132 53	0.419 73	0.003 10
306	F11	5	52	87	4	15.30	6.10	0.064 1	0.102 97	0.598 37	0.003 06
104	F4	4	139	218	2	14.00	6.40	0.056 2	0.063 56	0.564 95	0.002 92
454	F4	4	139	218	6	13.90	6.30	0.054 6	0.056 74	0.573 80	0.002 84
279	F4	4	139	218	4	12.90	7.40	0.054 5	0.080 69	0.533 00	0.002 83
484	F11	5	52	87	6	13.20	7.10	0.054 9	0.114 18	0.535 03	0.002 77
310	F12	6	545	6	4	13.00	7.80	0.058 0	0.127 90	0.394 50	0.002 74
541	F4	4	139	218	7	13.50	6.20	0.050 9	0.049 62	0.537 33	0.002 60
304	F10	10	44	11	4	16.50	7.60	0.090 6	0.066 19	0.253 97	0.002 52
658	F11	5	52	87	8	12.40	7.20	0.049 2	0.112 24	0.477 61	0.002 47
57	F15	8	65	77	1	15.20	8.20	0.082 5	0.058 25	0.409 24	0.002 44
473	F9	9	4	21	6	15.30	8.10	0.082 7	0.003 39	0.279 54	0.002 43
572	F11	5	52	87	7	11.50	8.00	0.046 6	0.123 79	0.454 88	0.002 39
380	F7	7	37	39	5	13.20	8.30	0.063 2	0.102 06	0.229 38	0.001 86
529	F1	11	11	56	7	15.00	8.60	0.083 9	0.062 46	0.208 41	0.001 76
478	F10	10	44	11	6	13.80	7.60	0.063 7	0.060 66	0.170 46	0.001 67
554	F7	7	37	39	7	13.40	8.30	0.065 1	0.090 58	0.194 59	0.001 65
553	F7	7	37	39	7	14.10	7.30	0.064 1	0.073 84	0.218 11	0.001 62
59	F15	8	65	77	1	14.00	6.30	0.055 4	0.026 44	0.368 93	0.001 58
293	F8	15	37	65	4	15.70	7.10	0.077 3	0.012 90	0.147 28	0.000 94

3 讨论

3.1 性状遗传力

开展树木性状遗传力研究,可为杉木育种方案制定或评估遗传改进程度提供理论依据。遗传力反映性状亲子传递能力,遗传力高的性状受遗传控制的影响较大,后代得到相同表现的可能性越高,反之则低。根据遗传力大小大致划分方法(>0.5:高遗传力;0.2~0.5:中等遗传力;<0.2:低遗传力),本研究供试的杉木三代全同胞家系树高遗传力为中低遗传力,而胸径和单株材积表现为中等遗传力,总体上杉木全同胞家系各性状受到一定遗传控制。遗传力不是一个常数,它只是某一树种群体在特定条件下的估量,这也是杉木遗传力大小在不同地点或不同试验设计时差异较大的原因。此外,一般认为同一群体的各种性状的遗传力的估值是存在一定规律性的,往往表现为遗传力随林龄的增加而增大的趋势^[21],这一点在研究中未能得到体现,可能与研究的林龄阶段及树木生长发育特性有关。

3.2 高世代育种群体亲本选择

杉木兼具有性与无性繁育能力,通过高世代遗传改良筛选出来的优良材料,既可以作为种子园建园亲本,也可以将优良群体无性繁殖利用,关键在于优异种质的创制和评价。对于杉木高世代育种群体构建,除了前向选择更高世代优树,还可以采用后向选择优良亲本。研究发现杉木6年生时选择准确度趋于稳定,这与叶培忠等^[21]认为在6~7年生时进行选择可以增大年度效益的结果相一致。所筛选出的优良家系的亲本和优良单株可用于建立第4代育种群体,中选优株可经无性系评价后应用于生产。不论是后向选择还是前向选择,在种子园建立时允许在不同的亚群体中存在有亲缘关系的个体,但对育种亲本的亲缘关系还是需加以控制。有研究表明^[22],应用具有一定共祖关系的个体建立种子园并不会因近交发生而降低遗传增益,利用完全无亲缘关系的材料建园将使预期增益明显减少。美国南方松改良协作组认为进入下代育种群体中的有亲缘关系的优树最多为5株^[23],研究中,除表现最优的2个家系F14和F13均有7个中选优株外,其他4个优良家系的中选优株均少于5个。由于选育世代的推进,育种群体数量变少,潜在亲缘关系的发生几率增大,这就需要在构建育种群体时,均衡考虑群体亲缘关系和生长增益问题,在亚群体构建时尽量避免亲缘关系发生,并借助于分子标记技术检测亲缘关系,指导新种质创新和种子园建设及生产用种。

3.3 优株选择方法

由于表型数据含有环境效应,仅以表型数据很难选择出遗传品质优良的改良材料,而育种值剔除了环境影响,反映了真实的遗传效应,可提高选择的精确性。在杉木育种实践往往会产生大量不均衡数据,这些数据一般不能采用传统统计方法进行数量遗传分析。BLUP利用混合线性模型方程对育种模型中的育种值等遗传参数进行无偏预测,可实现育种值的准确预估。但国内对于BLUP方法用于估算个体育种值的研究尚十分不足^[15,24],可能会造成林木育种实践中遗传材料的漏选或错选。研究利用BLUP方法估计亲本和子代个体的育种值,据此开展杉木高世代优良家系与个体的选育,提高了选育准确性,为杉木良种的后续选育提供了坚实材料基础。随着遗传标记和基因组时代的到来,将部分功能验证的候选标记联合BLUP计算育种值的标记辅助选择育种方法(MAS),不仅可以提高育种值估计的准确性,还可以进行早期选择,缩短世代间隔^[25]。而全基因组选择育种(GS)由于覆盖全基因组的标记,能更好地解释表型变异,已成为林木选择育种的发展趋势。

4 结论

利用BLUP方法,对2年生至7年生22个杉木第三代亲本全同胞家系的主要生长性状的遗传力及育种值进行了估算。研究发现杉木第三代全同胞家系间生长差异明显,单株材积表型和遗传变异系数最大,可作为家系选择的主要生长性状。树高、胸径和单株材积家系遗传力分别为0.116~0.274、0.217~0.253和0.203~0.290。入选的6个家系的树高、胸径和单株材积的现实增益分别为2.92%、16.36%和54.92%,其亲本可作为更高世代育种群体构建材料来源,子代家系繁殖利用可获得较高材积增益。基于单株育种值选择出的39个优株树高、胸径及单株材积现实增益分别28.38%、59.86%和218.53%,具有良好期望增益,这些入选的优良单株可用于第四代育种群体构建。

致谢:中国林科院院基金项目(CAFYBB2017ZA001-1)和江西省林业厅林业科技创新专项(201702)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 马常耕.世界加速林木育种轮回研究的现状[J].世界林业研究,1996,9(6):15-23.
MA C G.Research status of accelerated tree breeding of the world[J].World forestry research,1996,9(6):15-23.
- [2] 洪菊生.杉木造林优良种源选择[J].林业科学研究,1994,7(专刊):1-25.
HONG J S.Excellent provenance selection of *Cunninghamia lanceolata* afforestation [J].Forest research,1994,7(mono-graph):1-25.
- [3] 伍汉斌,段爱国,张建国.杉木地理种源不同林龄生长变异及选择[J].林业科学,2019,55(10):181-192.
WU H B,DUAN A G,ZHANG J G.Growth variation and selection effect of *Cunninghamia lanceolata* provenances at different stand ages[J].Scientia silvae Sinicae,2019,55(10):181-192.
- [4] 叶培忠,陈岳武,阮益初,等.杉木早期选择的研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),1981,5(1):106-116.
YE P Z,CHEN Y W,RUAN Y C, et al.Study on early selection of *Cunninghamia lanceolata* [J].Journal of Nanjing forestry university(natural science edition),1981,5(1):106-116.
- [5] 徐清乾,许忠坤,张颢,等.杉木第三代优树选择技术研究[J].湖南林业科技,2010,37(5):8-13.
XU Q Q,XU Z K,ZHANG X, et al.Study on selective technology of third generation *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) [J].Hunan forestry science & technology,2010,37(5):8-13.
- [6] 张贵云,陈瑞生,石杨文,等.贵州杉木第3代种子园建立及优良繁殖材料选择技术研究[J].种子,2010,29(3):75-77.
ZHANG G Y,CHENG R S,SHI Y W, et al.Study on establishing third generation seed orchard and clones selecting for *Cunninghamia lanceolata* (Lambhook.) in Guizhou province [J].Seed,2010,29(3):75-77.
- [7] 胡德活,林绪平,阮梓材,等.杉木无性系早-晚龄生长性状的相关性及早期选择的研究[J].林业科学研究,2001,14(2):168-175.
HU D H,LIN X P,RUAN Z C, et al.Study on the growth character correlation of Chinese fir clone and early selection [J].Forest research,2001,14(2):168-175.
- [8] 曾志光,肖复明,沈彩周,等.江西省优质速生杉木无性系选育研究[J].林业科学研究,2006,19(5):561-566.
ZENG Z G,XIAO F M,SHEN C Z, et al.Clone selection of Chinese fir with fast-growth and superior timber property [J].Forest research,2006,19(5):561-566.
- [9] 段爱国,张雄清,张建国,等.21年生杉木无性系生长与遗传评价[J].林业科学研究,2014,27(5):672-676.
DUAN A G,ZHANG X Q,ZHANG J G, et al.Growth and genetic evaluation of 21-year-old Chinese fir clonal plantation [J].Forest research,2014,27(5):672-676.
- [10] 张颢,徐清乾,许忠坤,等.杉木第三代种子园分步式营建技术[J].湖南林业科技,2017,4(5):100-104.
ZHANG X,XU Q Q,XU Z K, et al.Multiple-step techniques of establishment of the 3rd-generation seed orchard of *Cunninghamia lanceolata* [J].Hunan forestry science & technology,2017,44(5):100-104.
- [11] 李霞,王利宝,文亚峰,等.杉木不同世代育种群体的遗传多样性[J].林业科学,2020,56(11):53-61.
LI X,WANG L B,WEN Y F, et al.Genetic diversity of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) breeding populations among different generations [J].Scientia silvae Sinicae,2020,56(11):53-61.
- [12] 郑仁华,施季森,肖晖,等.杉木第3代种质资源自由授粉子代生长性状遗传变异及早期选择[J].南京林业大学学报(自然科学版),2014,57(6):38-42.
ZHENG R H,SHI J S,XIAO H, et al.Genetic variation and early selection of growth traits in 8-year-old open-pollinated progenies of the 3rd germplasm of Chinese fir [J].Journal of Nanjing forestry university (natural science edition),2014,57(6):38-42.
- [13] 何贵平,徐肇友,王帮顺,等.杉木杂交试验苗期主要性状遗传分析[J].江西农业大学学报,2015,37(5):836-842.
HE G P,XU Z Y,WANG B S, et al.Genetic analysis of main traits of Chinese fir at the seedling stage in crossing test [J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2015,37(5):836-842.
- [14] 贾晨,张时林,段爱国,等.杉木第3代种子园半同胞家系子代苗期测定[J].四川林业科技,2016,37(6):73-75.
JIA C,ZHANG S L,DUAN A G, et al.Half-sib progeny test and excellent family selection of the 3rd generation seed orchard

- for *Cunninghamia lanceolata*[J].Journal of Sichuan forestry science and technology,2016,37(6):73-75.
- [15] 孙晓梅,杨秀艳.林木育种值预测方法的应用与分析[J].北京林业大学学报,2011,33(2):65-71.
SUN X M, YANG X Y.Applications and analysis of methods for breeding value prediction in forest trees [J].Journal of Beijing forestry university,2011,33(2):65-71.
- [16] RESENDE M D V D, PRATES D F, JESUS A D, et al.Best linear unbiased prediction (BLUP) of breeding values in *Pinus* improvement[J].Parte do boletim de pesquisa florestal, Colombo, 1996,32/33:3-22.
- [17] 周志春,林荣联,兰永兆,等.马尾松实生种子园的遗传分析和育种值预测[J].林业科学研究,1999,12(2):132-138.
ZHOU Z C, LIN R L, LAN Y Z, et al.Genetic analysis and breeding value predication of seedling seed orchard of Masson pine[J].Forest research,1999,12(2):132-138.
- [18] 杨秀艳,张守攻,孙晓梅,等.北亚热带高山区日本落叶松自由授粉家系遗传测定与二代优树选择[J].林业科学,2010,46(8):45-50.
YANG X Y, ZHANG S G, SUN X M, et al.Genetic test of open-pollinated *Larix kaempferi* families and selection for the second generation elite trees in northern sub-tropical alpine area[J].Scientia silvae Sinicae,2010,46(8):45-50.
- [19] 刘天颐,杨会肖,刘纯鑫,等.火炬松基因资源的育种值预测与选择[J].林业科学,2014,50(8):60-67.
LIU T Y, YANG H X, LIU C X, et al.2014.Prediction of breeding values and selection to the gene resources of loblolly pine [J].Scientia silvae Sinicae,2014,50(8):60-67.
- [20] 欧阳芳群,祁生秀,范国霞,等.青海云杉自由授粉家系遗传变异与基于BLUP的改良代亲本选择[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,62(6):53-59.
OUYANG F Q, QI S X, FAN G X, et al.Genetic variation and improved parents selection of open pollination families of *Picea crassifolia* Kom. basing one BLUP method[J].Journal of Nanjing forestry university(natural science edition),2019,62(6):53-59.
- [21] 叶培忠,陈岳武,阮益初,等.杉木种子园遗传效益的估算[J].南京林业大学学报(自然科学版),1981,24(2):33-48.
YE P Z, CHEN Y W, RUAN Y C, et al.Estimates of genetic gains from the seed orchard of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*)[J].Journal of Nanjing forestry university(natural science edition),1981,24(2):33-48.
- [22] XIE C Y, CARLSON M R, MURPHY J C.Predicting individual breeding values and making forward selections from open-pollinated progeny test trials for seed orchard establishment of interior Lodgepole Pine (*Pinus contorta* ssp. *latifolia*) in british columbia[J].New forests,2007,33(2):125-138.
- [23] 马常耕.高世代种子园营建研究的进展[J].世界林业研究,1994,7(1):31-38.
MA C G.Research status of accelerated tree breeding of the world[J].World forestry research,1994,7(1):15-23.
- [24] 陈兴彬,肖复明,余林,等.基于混合线性模型估算杉木生长性状遗传参数[J].森林与环境学报,2018,38(4):419-424.
CHEN X B, XIAO F M, YU L, et al.Estimation of genetic parameters of *Cunninghamia lanceolata* growth traits based on mixed linear model[J].Journal of forest and environment,2018,38(4):419-424.
- [25] EL-KASSABY Y A, KLÁPŠTĚ J, GUY R D.Breeding without breeding: selection using the genomic best linear unbiased predictor method(GBLUP)[J].New forests,2012,43(5/6):631-637.